

Rotor für eine Turbomaschine und  
Verfahren zur Herstellung eines solchen Rotors

Die Erfindung betrifft einen Rotor für eine Turbomaschine, insbesondere für eine Gasturbine, gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1. Des weiteren betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Rotors gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 8.

Nach dem Stand der Technik unterscheidet man prinzipiell zwei Arten von Rotoren für eine Turbomaschine, nämlich sogenannte integral beschaufelte Rotoren von solchen Rotoren, bei welchen die Laufschaufeln über Schaufelfüße in den Rotor eingesetzt sind. Die hier vorliegende Erfindung betrifft integral beschaufelte Rotoren. Die integral beschaufelten Rotoren werden abhängig davon, ob ein scheibenförmiger oder ein ringförmiger Rotorgrundkörper vorliegt, entweder als Blisk (Bladed Disk) oder als Bling (Bladed Ring) bezeichnet. Bei solchen integral beschaufelten Rotoren sind die Laufschaufeln fest mit dem ringförmigen oder scheibenförmigen Rotorgrundkörper verbunden und demnach integraler Bestandteil des Rotorgrundkörpers.

Moderne Turbomaschinen, insbesondere Gasturbinen wie Flugtriebwerke, müssen höchsten Ansprüchen im Hinblick auf Zuverlässigkeit, Gewicht, Leistung, Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer gerecht werden. Um die obigen Anforderungen an eine Gasturbine, insbesondere ein optimiertes Gewicht derselben, zu erzielen, muss insbesondere auch der Rotor im Hinblick auf die obigen Anforderungen optimiert werden. Hierbei spielt unter anderem die Werkstoffauswahl sowie die Suche nach neuen, geeigneten Werkstoffen eine entscheidende Rolle. Aus dem Stand der Technik ist es bereits bekannt, zur Gewichtsoptimierung als Werkstoff für einen Rotor einer Gasturbine sogenannte faserverstärkte Verbundwerkstoffe zu verwenden. Derartige Verbundwerkstoffe verfügen über ein Trägermaterial, welches als eine Metallmatrix ausgebildet ist, sowie über in das Trägermaterial eingebettete Fasern. Einen derartigen Verbundwerkstoff bezeichnet man auch als Metallmatrix-Verbundwerkstoff - kurz MMC.

Bei hochfesten MMC-Werkstoffen, bei denen Titan als Trägermaterial zum Einsatz kommt, kann das Gewicht von Bauteilen um bis zu 50 % gegenüber herkömmlichen Titanlegierungen reduziert werden. Als Verstärkungen werden Fasern mit hoher Festigkeit und hohem Elastizitätsmodul, zum Beispiel SiC-Fasern, verwendet.

Bei aus dem Stand der Technik bekannten, integral beschaukelten Rotoren in MMC-Bauweise sind die Faserverstärkungen in Form eines oder mehrerer relativ dünnwandiger, zylindrischer Ringe in ein Bauteil mit Laufschaufeln eingebracht. Dies erfolgt nach dem Stand der Technik dadurch, dass zuerst die Ringe separat gewickelt und in einem Fügeprozess zu einem faserverstärkten MMC-Werkstoff verdichtet und verschweißt werden. Diese Ringe werden bearbeitet, zusammengesteckt und wiederum durch einen Fügeprozess untereinander sowie mit dem zu tragenden, die Laufschaufeln aufweisenden Bauteil verbunden. Eine derartige Ausgestaltung eines integral beschaukelten Rotors in MMC-Bauweise verfügt über den Nachteil, dass zwischen den Laufschaufeln und den MMC-Ringen Fügezonen ausgebildet sind. Diese Fügezonen verfügen über eine relativ geringe Festigkeit, weshalb nur beschränkte Zentrifugalkräfte aufgenommen werden können. Fügezonen stellen immer potentielle Fehlstellen dar, die sich mithilfe der verfügbaren, zerstörungsfreien Prüfverfahren nicht immer ausreichend detektieren lassen. Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass das Herstellverfahren für derartige, aus dem Stand der Technik bekannte, integral beschaukelte Rotoren in MMC-Bauweise aufwendig und kostspielig ist.

Hiervon ausgehend liegt der vorliegenden Erfindung das Problem zu Grunde, einen neuartigen Rotor für eine Turbomaschine, insbesondere für eine Gasturbine, sowie ein Verfahren zur Herstellung desselben vorzuschlagen.

Dieses Problem wird dadurch gelöst, dass der eingangs genannte Rotor durch die Merkmale des kennzeichnenden Teils des Patentanspruchs 1 weitergebildet ist. Erfindungsgemäß ist der Rotorgrundkörper ringförmig ausgebildet, wobei der ringförmige Rotorgrundkörper in einem radial innenliegenden Abschnitt mindestens eine nutartige Ausnehmung aufweist, die von radial innen mit zugfesten Fasern befüllt ist. Mit der hier vorliegenden Erfindung wird erstmals ein integral beschaukelter Rotor in kombinierter Bling-Bauweise und

MMC-Bauweise vorgeschlagen, der zwischen den Laufschaufeln und den MMC-Ringen keine Fügezone aufweist und demnach über verbesserte Festigkeitseigenschaften verfügt.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung eines solchen integral beschaufelten Rotors ist im unabhängigen Patentanspruch 8 definiert.

Bevorzugte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen und der nachfolgenden Beschreibung. Ausführungsbeispiele der Erfindung werden, ohne hierauf beschränkt zu sein, an Hand der Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigt:

- Fig. 1      einen stark schematisierten Ausschnitt aus einem erfindungsgemäßen Rotor nach einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung im Querschnitt; und  
Fig. 2      einen stark schematisierten Ausschnitt aus einem erfindungsgemäßen Rotor nach einem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung im Querschnitt.

Fig. 1 zeigt einen stark schematisierten Querschnitt durch einen erfindungsgemäßen Rotor 10, wobei der Rotor 10 ein integral beschaufelter Rotor ist. Der Rotor 10 wird von einem ringförmigen Rotorgrundkörper 11 gebildet, wobei der Rotorgrundkörper 11 über einen radial innenliegenden Abschnitt 12 und einen radial außenliegenden Abschnitt 13 verfügt. Der radial außenliegende Abschnitt 13 dient der Bereitstellung mehrerer Laufschaufeln. Der radial innenliegende Abschnitt 12 ist aus einem MMC-Verbundwerkstoff hergestellt.

Wie bereits erwähnt, zeigt Fig. 1 einen Querschnitt durch den Rotor 10 bzw. den Rotorgrundkörper 11, wobei die Axialrichtung des Rotors 10 in Fig. 1 durch einen Pfeil 14 visualisiert ist. Die Radialrichtung des Rotors 10 ist durch einen Pfeil 15 gezeigt. Die Umfangsrichtung des Rotors 10 steht senkrecht auf der Axialrichtung 14 sowie der Radialrichtung 15.

Gemäß Fig. 1 sind in den Rotorgrundkörper 11, nämlich in den radial innenliegenden Abschnitt 12 desselben, nutartige Ausnehmungen 16 eingebracht. Die nutartigen Ausnehmungen 16 erstrecken sich beginnend von einer radial innenliegenden Mantelfläche 17 radial nach außen. Fig. 1 kann entnommen werden, dass die Ausnehmungen 16 in radialer

Richtung (Pfeil 15) eine größere Abmessung aufweisen als in axialer Richtung (Pfeil 14). Mehrere Ausnehmungen 16 sind in Axialrichtung des Rotors 10 bzw. Rotorgrundkörpers 11 hintereinander positioniert, erstrecken sich ausschließlich im radial innenliegenden Abschnitt 12 des Rotorgrundkörpers 11 und enden mit Abstand zum radial außenliegenden Abschnitt 13 desselben. Wie ebenfalls Fig. 1 entnommen werden kann, verfügen die nutartigen Ausnehmungen 16 an einer radial außenliegenden Begrenzung 18 über ein abgerundetes oder bogenförmiges Profil bzw. eine abgerundete bzw. bogenförmige Kontur.

Im Sinne der hier vorliegenden Erfindung sind die sich im Wesentlichen in radialer Richtung sowie in Umfangsrichtung erstreckenden, nutartigen Ausnehmungen 16 von radial innen mit zugfesten Fasern befüllt. Bei diesen zugfesten Fasern kann es sich zum Beispiel um Siliziumcarbidfasern handeln. Der Rotorgrundkörper 11 ist aus einem metallischen Matrixmaterial, insbesondere aus Titan, gebildet. Durch die Befüllung der Ausnehmungen 16 mit Fasern werden sogenannte MMC-Ringe geschaffen.

Wie Fig. 1 entnommen werden kann, sind die mit Fasern befüllten, nutartigen Ausnehmungen 16 an der radial innenliegenden Mantelfläche 17 bzw. am radial innenliegenden Ende derselben von mindestens einer zylindrischen Schale 19 aus Matrixmaterial begrenzt. Die zylindrische Schale 19 ist aus Fertigungsgründen erforderlich, nimmt jedoch keine Kräfte auf und kann daher in einem späteren Bearbeitungsschritt zumindest teilweise abgearbeitet werden.

Durch das oben beschriebene, erfindungsgemäße Konstruktionsprinzip für einen integral beschauften Rotor 10 werden quer verlaufende, also in Axialrichtung sowie in Umfangsrichtung verlaufende Fügezonen zwischen den MMC-Ringen, die in den radial innenliegenden Abschnitt 12 eingebracht sind, und den Laufschaufeln, die vom radial außenliegenden Abschnitt 13 bereitgestellt werden, vermieden. Hierdurch lassen sich verbesserte Festigkeitseigenschaften für den integral beschauften Rotor 10 erzielen.

Zur Herstellung des in Fig. 1 gezeigten, integral beschauften Rotors 10 wird im Sinne der hier vorliegenden Erfindung so vorgegangen, dass in einem ersten Schritt ein ringförmiger Rotorgrundkörper 11 bereitgestellt wird, der über einen radial innenliegenden Abschnitt 12

sowie einen radial außenliegenden Abschnitt 13 verfügt, wobei der radial außenliegende Abschnitt 13 der Bereitstellung der Laufschaufeln dient. In den radial innenliegenden Abschnitt 12 werden sodann die nutartigen Ausnehmungen 16 eingebracht, nämlich in die radial innenliegende Mantelfläche 17 desselben. Die nutartigen Ausnehmungen 16 sind demnach am radial innenliegenden Ende offen und erstrecken sich in radialer Richtung in das metallische Matrixmaterial des radial innenliegenden Abschnitts 12 des Rotorgrundkörpers 11 hinein. Des weiteren sind die Ausnehmungen 16 in Umfangsrichtung als geschlossene ringförmige Nuten ausgeführt. Wie bereits erwähnt, werden die Ausnehmungen 16 derart in den radial innenliegenden Abschnitts 12 des Rotorgrundkörpers 11 eingebracht, dass die Ausnehmungen 16 radial außen mit Abstand zum radial außenliegenden Abschnitt 13 enden und an der entsprechenden Begrenzung 18 eine abgerundete bzw. eine bogenförmige Kontur aufweisen.

Die am radial innenliegenden Ende, also an der radial innenliegenden Mantelfläche 17 des Rotorgrundkörpers 11, offenen und nutförmigen Ausnehmungen 16 werden in einem nächsten Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens von radial innen mit zugfesten Fasern befüllt. Bei diesen zugfesten Fasern handelt es sich insbesondere um Siliziumcarbidfasern. Es können jedoch auch andere zugfeste Fasern Verwendung finden.

Nachdem die Ausnehmungen 16 mit zugfesten Fasern befüllt worden sind, wird in einem nächsten Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens der Rotorgrundkörper 11 aus dem metallischen Matrixmaterial zusammen mit den in den Ausnehmungen 16 des Rotorgrundkörpers 11 angeordneten, zugfesten Fasern durch Druckeinwirkung bei hoher Temperatur verdichtet. Hierzu wird zuerst der mit zugfesten Fasern befüllte Rotorgrundkörper im Vakuum positioniert, wobei im Vakuum die noch am radial innenliegenden Ende offenen, mit Fasern befüllten Ausnehmungen 16 durch mindestens eine zylindrische Schale 19 aus metallischem Matrixmaterial gasdicht verschlossen werden. Die so bereitgestellte, gasdichte Kapsel, wird dann durch heißisostatisches Pressen verdichtet. Hierdurch wird demnach lediglich eine Fügezone ausgebildet, nämlich im Bereich der radial innenliegenden Mantelfläche 17 des Rotorgrundkörpers 11. Fügezonen werden demnach in aus Festigkeitsgesichtspunkten unkritische Bereiche des Rotors 10 gelegt.

Nach dem Verdichten werden im Bereich des radial außenliegenden, faserfreien Abschnitts 13 die Laufschaufeln durch insbesondere Fräsen herausgearbeitet. Es ist auch möglich, dass bereits zu Beginn des erfindungsgemäßen Verfahrens ein ringförmig ausgebildeter Rotorgrundkörper bereitgestellt wird, an dessen radial außenliegendem Abschnitt 13 die Laufschaufeln schon herausgearbeitet sind. In diesem Fall würde nach dem Verdichten des Rotorgrundkörpers lediglich eine Endbearbeitung der Laufschaufeln durchgeführt werden.

Im Sinne der hier vorliegenden Erfindung wird demnach ein integral beschauelter Rotor in kombinierter Bling-Bauweise sowie MMC-Bauweise vorgeschlagen, der keine querverlaufenden Fügezonen zwischen den Laufschaufeln und den MMC-Verstärkungsringen aufweist. Dies ist aus Festigkeitsgründen besonders vorteilhaft.

Bedingt durch die bogenförmige Kontur der Ausnehmungen 16 an deren radial außenliegender Begrenzung 18 lassen sich Übergänge zwischen den MMC-Ringen und dem metallischen Matrixmaterial festigkeitsoptimiert gestalten. Festigkeitssprünge am Übergang von den MMC-Ringen zum Matrixmaterial werden demnach gemindert.

Durch die in radialer Richtung größeren Abmessungen der Ausnehmungen 16 als in axialer Richtung derselben werden Querschnitte der MMC-Verstärkungsringe so ausgelegt, dass die Verstärkungskraft vorwiegend über Schubkräfte übertragen wird.

Fig. 2 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel der Erfindung, welches im Wesentlichen dem Ausführungsbeispiel der Fig. 1 entspricht. Daher werden zur Vermeidung unnötiger Wiederholungen für gleiche Baugruppen gleiche Bezugsziffern verwendet. Das Ausführungsbeispiel der Fig. 2 unterscheidet sich vom Ausführungsbeispiel der Fig. 1 lediglich durch die Querschnittsgestaltung der Ausnehmungen 16. Verlaufen beim Ausführungsbeispiel der Fig. 1 die axial voneinander beabstandeten Begrenzungswände der Ausnehmungen 16 im Wesentlichen parallel zueinander, so schließen beim Ausführungsbeispiel der Fig. 2 diese Wände einen Winkel ein, derart, dass sich die Ausnehmungen 16 in radialer Richtung nach außen hin verjüngen, also im Querschnitt eine konische Kontur aufweisen. Dies resultiert dann nach Befüllung der Ausnehmung mit den zugfesten Faser in sich in radialer Richtung

nach außen hin konisch zulaufende MMC-Ringe, wodurch die Festigkeitseigenschaften des Rotors nochmals verbessert werden können.

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, dass im Sinne der hier vorliegenden Erfindung ein integral beschauelter Rotor in Bling-Bauweise vorgeschlagen wird, der keine festigkeitsreduzierenden, in Axialrichtung bzw. in Umfangsrichtung verlaufenden Fügzone zwischen den Laufschaufeln und den MMC-Verstärkungsringen aufweist. Der erfindungsgemäße, integral beschauelte Rotor in Bling-Bauweise besteht aus einem ringförmigen Rotorgrundkörper, der in einem radial außenliegenden Abschnitt über einen Schaufelkranz bildende Laufschaufeln verfügt oder im radial außenliegenden Abschnitt über einen ausreichend großen Querschnitt verfügt, sodass die Laufschaufeln des Schaufelkranzes herausgearbeitet werden können. In einem radial innenliegenden Abschnitt des Rotorgrundkörpers sind die MMC-Verstärkungsringe angeordnet, wobei diese MMC-Verstärkungsringe dadurch hergestellt werden, dass nutartige Ausnehmungen von innen her mit zugfesten Fasern befüllt werden. Die Ausnehmungen sind demnach radial nach innen offen und werden nach dem Befüllen von mindestens einer zylindrischen Schale gasdicht verschlossen, um anschließend bei hohen Temperaturen unter Druckeinwirkung verdichtet zu werden. Auf diese Art und Weise ergibt sich eine besonders einfache Herstellung eines MMC-Blings.

## Patentansprüche

1. Rotor für eine Turbomaschine, insbesondere für eine Gasturbine, mit einem Rotorgrundkörper (11) und mehreren über den Umfang des Rotorgrundkörpers (11) verteilt abgeordneten Laufschaufeln, wobei der Rotorgrundkörper (11) aus einem MMC-Verbundwerkstoff hergestellt ist, und wobei die Laufschaufeln integraler Bestandteil des Rotors sind, dadurch gekennzeichnet, dass der Rotorgrundkörper (11) ringförmig ausgebildet ist, wobei der ringförmige Rotorgrundkörper (11) in einem radial innenliegenden Abschnitt (12) mindestens eine nutartige Ausnehmung (16) aufweist, die von radial innen mit zugfesten Fasern befüllt ist.
2. Rotor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass in axialer Richtung (14) des Rotorgrundkörpers (11) hintereinander mehrere nutartige, mit Fasern befüllte Ausnehmungen (16) angeordnet sind.
3. Rotor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass sich die oder jede Ausnehmung (16) ausgehend von einer radial innenliegenden Mantelfläche (17) des Rotorgrundkörpers (11) radial in den radial innenliegenden Abschnitt (12) des Rotorgrundkörpers (11) hinein erstreckt und mit Abstand von einem radial außenliegenden Abschnitt (13) des Rotorgrundkörpers (11), welcher der Bereitstellung der Laufschaufeln dient, endet.
4. Rotor nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die oder jede Ausnehmung (16) an einer radial außenliegenden Begrenzung (18) derselben ein abgerundetes oder bogenförmiges Profil aufweist.
5. Rotor nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die oder jede Ausnehmung (16) in radialer Richtung (15) eine größere Abmessung aufweist als in axialer Richtung (14).



6. Rotor nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die oder jede Ausnehmung (16) am radial innenliegenden Ende von mindestens einer zylindrischen Schale (19) aus Matrixmaterial begrenzt ist.
7. Rotor nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die oder jede Ausnehmung (16) im Querschnitt konisch ausgebildet ist, derart, dass sich die oder jede Ausnehmung (16) ausgehend vom radial innenliegenden Ende in radial Richtung verjüngt.
8. Verfahren zur Herstellung eines integral beschauften Rotors für eine Turbomaschine, insbesondere für eine Gasturbine, mit folgenden Schritten:
  - a) Bereitstellen eines ringförmig ausgebildeten Rotorgrundkörpers (11) aus metallischem Matrixmaterial mit einem radial innenliegenden Abschnitt (12) und einem radial außenliegenden Abschnitt (13), wobei der radial außenliegende Abschnitt (13) der Bereitstellung von Laufschaufeln dient,
  - b) Einbringen mindestens einer nutartigen Ausnehmung (16) in den radial innenliegenden Abschnitt (12) des Rotorgrundkörpers (11), wobei die oder jede Ausnehmung (16) an einem radial innenliegenden Ende offen ist und mit Abstand zum radial außenliegenden Abschnitt (13) endet,
  - c) Befüllen der oder jeder nutartigen Ausnehmung (16) von radial innen mit zugfesten Fasern,
  - d) Verdichten des Rotorgrundkörpers (11) aus metallischem Matrixmaterial und der zugfesten Fasern durch Druckeinwirkung bei hoher Temperatur.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass nach dem Befüllen der oder jeder Ausnehmung (16) mit den zugfesten Fasern die oder jede Ausnehmung (16) am radial innenliegenden Ende von mindestens einer zylindrischen Schale (19) aus Matrixmaterial unter Vakuum gasdicht abschlossen wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die so bereitgestellte, gasdichte Kapsel durch heißisostatisches Pressen verdichtet wird.

11. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass nach dem Verdichten im Bereich des radial außenliegenden, faserfreien Abschnitts (13) die Laufschaufeln durch insbesondere Fräsen herausgearbeitet werden.

### Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft einen Rotor für eine Turbomaschine, insbesondere für eine Gasturbine.

Der Rotor verfügt über einen Rotorgrundkörper (11) und mehrere über den Umfang des Rotorgrundkörpers (11) verteilt abgeordneten Laufschaufeln, wobei der Rotorgrundkörper (11) aus einem MMC-Verbundwerkstoff hergestellt ist, und wobei die Laufschaufeln integraler Bestandteil des Rotors sind.

Erfindungsgemäß ist der Rotorgrundkörper (11) ringförmig ausgebildet, wobei der ringförmige Rotorgrundkörper (11) in einem radial innenliegenden Abschnitt (12) mindestens eine nutartige Ausnehmung (16) aufweist, die von radial innen mit zugfesten Fasern befüllt ist.

(Fig. 1)